



Tokyo Gakugei University Repository

東京学芸大学リポジトリ

<http://ir.u-gakugei.ac.jp/>

Title	蒸散や吸水とは無関係な切り花着色剤の茎や葉柄への浸透(fulltext)
Author(s)	犀川,政稔
Citation	東京学芸大学紀要. 自然科学系, 67: 151-162
Issue Date	2015-09-30
URL	http://hdl.handle.net/2309/139359
Publisher	東京学芸大学学術情報委員会
Rights	

蒸散や吸水とは無関係な切り花着色剤の茎や葉柄への浸透

犀川 政 稔*

環境科学分野

(2015年5月22日受理)

SAIKAWA, M.: Infiltration of colored water into stems and petioles of plants independent of the water uptake by transpiration. Bull. Tokyo Gakugei Univ. Div. Nat. Sci., 67: 151-162. (2015) ISSN 1880-4330

Abstract

Longitudinally-cut small pieces (6~10 cm long) of fresh bamboo shoots of *Chimonobambusa marmorea* f. *albostriata* showed instant infiltration of the colored water named “fantasy” at a rate of 5mm/sec, immediately after contact with the water surface at both cut ends. After the initial infiltration, the colored water continued to spread at a rate of 0.85mm/sec. The colored water was also found to infiltrate into other pieces of another bamboo shoots, ca. 20cm long, through their vascular bundles after when one of the pieces was put into the colored water inverted in position, and even after when other two pieces were killed by microwave treatment before putting them into the colored water. In the latter case, one of the two dead pieces was done inverted in position. The colored water showed its infiltration *in situ* into a bamboo shoot, 220cm tall, not from the base but from the cut end of the top. The initial infiltration rate was 50cm in 10 minutes in the latter case. Similar experiments were done using the petioles of *Ricinus sativus* and obtained similar results of infiltration of the colored water as in the bamboo shoots. The colored water, fantasy, would not be able to use for the purpose to show the water uptake by transpiration of plant leaves to schoolchildren. Because the plant materials used in the present study do not have leaves for transpiration.

Keywords: dicot, Hales, monocot, plant physiology, science textbook

Department of Environmental Sciences, Tokyo Gakugei University, 4-1-1 Nukuikita-machi, Koganei-shi, Tokyo 184-8501, Japan

要旨: チゴカンチク（単子葉植物）のたけのこ（葉が展開する前のシュート）の節間部を長さ6~10 cmに切り取ってすぐ縦に割り、下端および上端の切り口を色水（切り花着色剤で商品名はファンタジー）と接触させたところ、色水は瞬時（1秒間に5 mm）に浸透し、その後は1秒あたり0.85 mmの速度で浸透を続けた。また、長さおよそ20 cmに切り取った茎については、切り取ったままの茎の他に、上下を逆にした茎、電子レンジで死滅させた茎、死滅させたあと上下を逆にした茎、の4種類を同時に色水に挿してみた。その結果、色水はどの茎においても浸透したが、前二者の生きている茎のうち、上下を逆にしたものがいち早く1時間16分後に切り口に到達した。3時間47分後には断面に見える維管束のうち、表皮に近いものが濃く色づいた。後二者の死滅した茎の場合、色水は切り口までは到達しなかった。チゴカンチクについては色水の*in situ*における浸透実験も行った。すなわち、伸びきったたけのこ（長さ220 cm）の先端（約2 cm）を切り捨てたあと、その部分を下方に曲げ、色水に差し込んだ。10分

* 東京学芸大学 広域自然科学講座 環境科学分野（184-8501 小金井市貫井北町4-1-1）

後にシュート全体を切り取ってから10 cmの間隔に切って切断面を調べたところ色水は先端から50 cm下まで浸透していた。双子葉植物のヒマ（トウゴマ）の葉柄についてもチゴカンチクと同様の実験を行った。その結果色水は切り取って縦に割った葉柄の切り口から上下方向に浸透したし、切り取っただけの葉柄、上下を逆にした葉柄、電子レンジ処理した葉柄、処理後上下を逆にした葉柄に対しても浸透した。しかし、浸透は死滅させた2種類の葉柄においてはチゴカンチクの死滅茎の場合と同様葉柄の途中で停止した。また、植栽されているヒマについても*in situ*での浸透実験を実施した。その結果、色水は葉身部を切り捨てた葉柄先端部から、通常の汁液（sap）の流れとは反対の方向、つまり葉柄基部に向かって浸透した。以上述べたいずれの場合においても植物材料には葉がついていないか、あるいはたけのこのように葉が展開していない状態にあった。よってこれらの場合、色水の植物体への浸透は葉における蒸散および、蒸散によっておこる吸水とは無関係である。

1. はじめに

Dixon and Joly (1894) による凝集説が維管束の木部における汁液と無機塩類の輸送に対する説明として受け入れられてきた。蒸散による葉からの水の減少が仮道管と道管における水柱（water column）の張力（tension）を発生させる原因であるという（Mohr and Schopfer, 1995; Beck, 2010）。しかし、実際は汁液が、水柱の張力とは関係なく細胞間隙や細胞壁に浸透し、上昇することもある。たとえば、市販されているある色水（切り花着色剤；商品名ファンタジー）はシモバシラ（*Keiskea japonica*）の枯れた茎の木部に浸み込んで上昇することが知られている（犀川, 2006, *figs. 15-19*; 2007, *figs. 1-18*）。そこで本研究ではその色水の浸透の程度について調べてみた。ファンタジーは最近教材カタログに掲載され、理科実験用の消耗品として購入できるようになっており（岩手県立総合教育センター, 2012）、教員研修などでも紹介されているが（松永・佐伯, 2011; 那覇市立教育研究所, 2012）、ここではその色水の使用が植物の「蒸散による吸水」を示す実験や観察には不相当であることについても考察する。

2. 材料と方法

秋から冬に向かってたけのこを伸ばす白い斑入りのチゴカンチク（*Chimonobambusa marmorea* f. *albostrata*, イネ科の単子葉植物）とその頃依然として元気なヒマ（別名トウゴマ; *Ricinus sativus*, トウダイグサ科の双子葉植物で外国における教材植物の1種）を材料に用いた。わが国の教材植物であるハウセンカ（*Impatiens balsamina*, ツリフネソウ科, 双子葉植物）はその種子とともに予備実験に使用した。汁液が通る維管束は、チゴカンチクのもので単子葉植物に一般的な散在維管束であるのに対して（図1A）。ヒマの葉柄（図1B）

とハウセンカの茎（図1C）の維管束は双子葉植物に一般的な密着型や連続型ではなく維管束間形成層をもつIFC型である（犀川, 2014）。ハウセンカの場合、芽生えの胚軸（hypocotyl）もIFC型であった（図1D）。チゴカンチクのたけのこは、最も長いもので220 cmあり、35~40本が一斉に伸びていた。たけのこの中の茎は中実で細く、中間部の太さは5 mm程度であった。葉は展開する前で、すべてが葉鞘の中に納まっていた（図7C-F）。用いたヒマは1本で、草丈は約95 cmであった。掌状に中深裂した大きな葉（葉身の直径は~45 cm; 葉柄の長さは~38 cm）をつけていた。ハウセンカはどれもが生育に最適な時期をはるかに過ぎていたので、10枚以上の正常な形の葉をつけている茎を選んで用いた。果実の中の種子は芽生えを観察する目的で採取した。なお、ヒマの場合茎ではなく葉柄をもちいた理由は、茎にはタケ類のように2~6 cmおきに節（node）があり、しかも節間（internode）の距離が一定でないため（図9A, B）形の同じような材料を揃えることが困難であったからである。それ以外の点についてはヒマの茎と葉柄はどちらも中空でよく似ており、両者を横断切片像で区別することは困難なほどである。

実験に用いた色水には切り花着色剤の“ファンタジー”（パルス化学：横浜市金沢区福浦；色素の種類などは未公開）を使用した。ファンタジーにはたくさん色揃えがあるが、ここでは赤と青のみを使用した。色水を入れるための容器としてはビーカー（100 ml）、広口ガラス瓶（直径55 mm, 高さ220 mm）、それにチャック式ポリ袋（ユニパックF-4型=170×120×0.04 mm; 生産日本社；東京）を使用した。なお、葉柄および茎の切断にはスチール製のフェザー剃刀S両刃（フェザー安全剃刀；大阪）を使用した。植物の撮影には、キヤノン（東京）製のEOSM2にズームレンズのEF-M 18-55 mmを装着したカメラと、EOS 6 DにMP-E 65 mm f 2.8 1-5×, またはEF100 mm f 2.8 USMを装

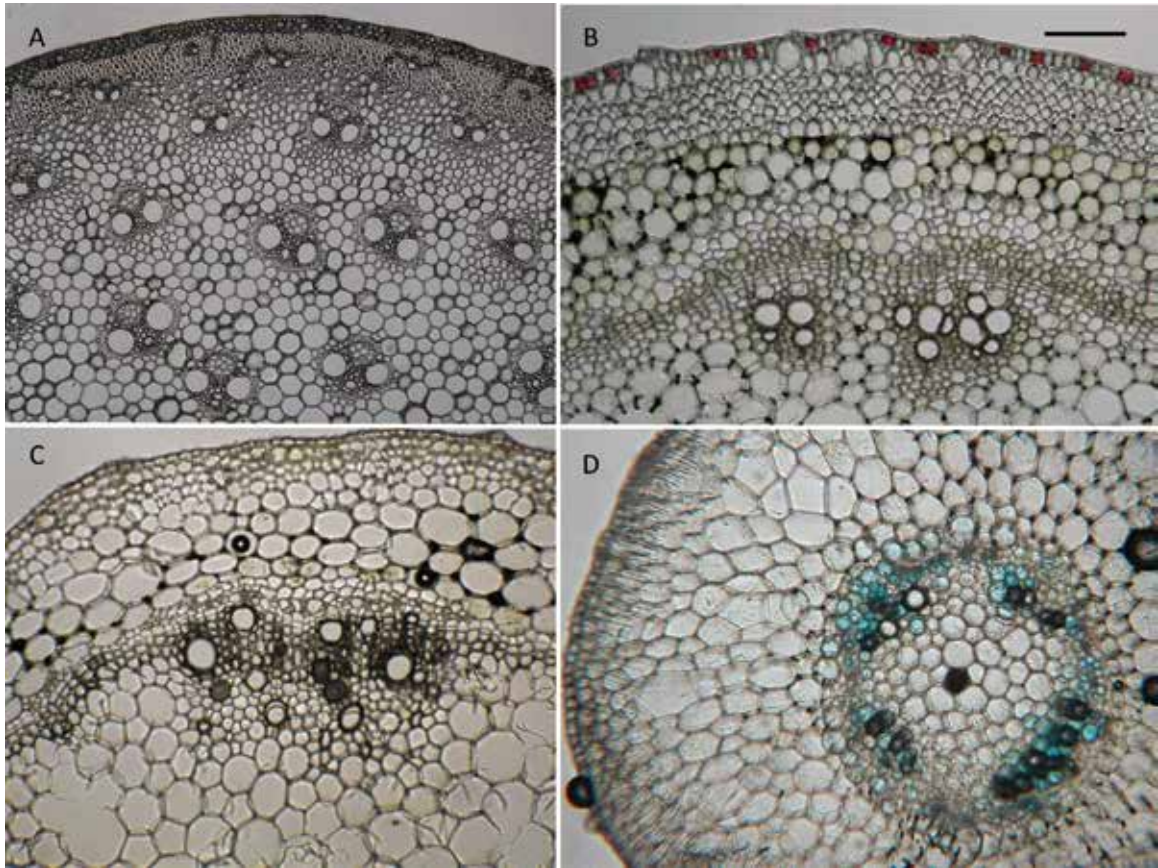


図1. 用いた植物の茎、葉柄および胚軸の横断切片像。A. チゴカンチクの茎の散在維管束。B. ヒマの葉柄のIFC型の維管束。C. ホウセンカの茎のIFC型の維管束。D. ホウセンカの胚軸のIFC型の維管束。色水によって道管のまわりの維管束の細胞が青く着色しているが染色されているわけではなく、色は速やかに消滅する。スケール：240 μm =A; 320 μm =B; 300 μm =C; 240 μm =D。

着したカメラを用いた。ときにはレンズにマクロリングライトMR-14EXを装着した。また、胚軸と茎の徒手切片は、Zeiss製の顕微鏡Axioplan (Oberkochen, ドイツ)に、同じくZeiss製のPlan Neofluar 10 \times をつけて観察し、キヤノン製EOS 5 D Mark IIで撮影した。

3. 結果

3. 1 予備実験

ファンタジーが他の色水より植物体によく浸透することを確かめた後、ホウセンカの茎と芽生えを用いて予備的な実験を行った。2014年10月のことである。ただし、芽生えについては翌年の1月と4月にも再実験を行った。

3. 1. 1 各種色水からのファンタジーの選択、およびファンタジーと水との混ざり合い

ノハカタカラクサ (*Tradescantia flumiensis*, ツククサ科、単子葉植物)の茎を用いて数種類の色水の茎や葉に対する浸透性を比較した(図2A)。先端部に3枚の葉を残した茎(長さ20 cm)を各種の色水(通常のインク、顔料インク、ファンタジー、ニュートラル

レッド、水溶性アニリンブルー)に挿して比較した。5時間後に調べたところファンタジーだけが最もよく茎に浸透し、葉を着色した(図2A, *印)。次にファンタジーと水との混ざり合いについてテストした(図2B-F)。すなわち、パストゥールピペットaと同bのそれぞれに水とホウセンカの葉の破碎液を吸い込んで止め(図2B)、ファンタジーの色水中に挿し込んだ。すると、色水はピペットの毛細管部に瞬時に浸透した(図2C, D)。しかし、その後ピペットの太い部分へはほとんど上昇しなかった。10時間後に確認したところ、色水はやや上昇しており、ピペットの毛細管部の少し上のところまで水と混ざっていたが(二重矢印)、それより昇ることはなかった(図2E, F)。

3. 1. 2 ホウセンカの芽生えを用いた予備実験

根が色水を吸うかどうかをテストした(図3)。以下は2015年3月31日~4月22日に実施した再実験の結果である。まず2本の広口ガラス瓶の中に寒天平板を作り、それぞれの平板上にホウセンカの種子を5粒播いて半透明のプラスチックのふたをした。瓶は直射光の当たらない半日陰に置いた。翌日1つの瓶の5粒の



図2. 色水の茎への浸透, および色水(ファンタジー)と水との混ざり合い。A. 色水の浸透。葉を3枚残したノハカタカラクサの茎を用いた。色水はポリ袋に入っている。ink-a, 通常のインク; ink-b, 顔料インク; fant, ファンタジー赤液; n-red, ニュートラルレッド; ani-bl, 水溶性アニリンブルー。A. 実験開始から5時間後。ファンタジーのみが葉を濃く染めた(*印)。B-F. ファンタジーと水との混ざり合い。B. 色水との接触前。ピペットa, bにはそれぞれ水道水と葉(ハウセンカ)の破碎液とが吸い上げられている。C. 実験開始直後。色水は一瞬のうちに矢印のところまで上昇した。D. 前図の4秒後, 全体の様子を示す。色水のさらなる上昇は見られない。E. 10時間後。色水はやや上昇して水と混ざった(二重矢印)。矢印, 実験開始直後に色水が上昇した高さ(図2Cの矢印と同じ場所)。F. 前図の拡大。色水と水および葉の破碎液との混ざり具合を示す。B-Eには撮影した時間(月日と時:分)が入っている。スケール: 2 cm=A, B; 1.8 cm=C; 7 cm=D; 3.5 cm=E; 1.4 cm=F。

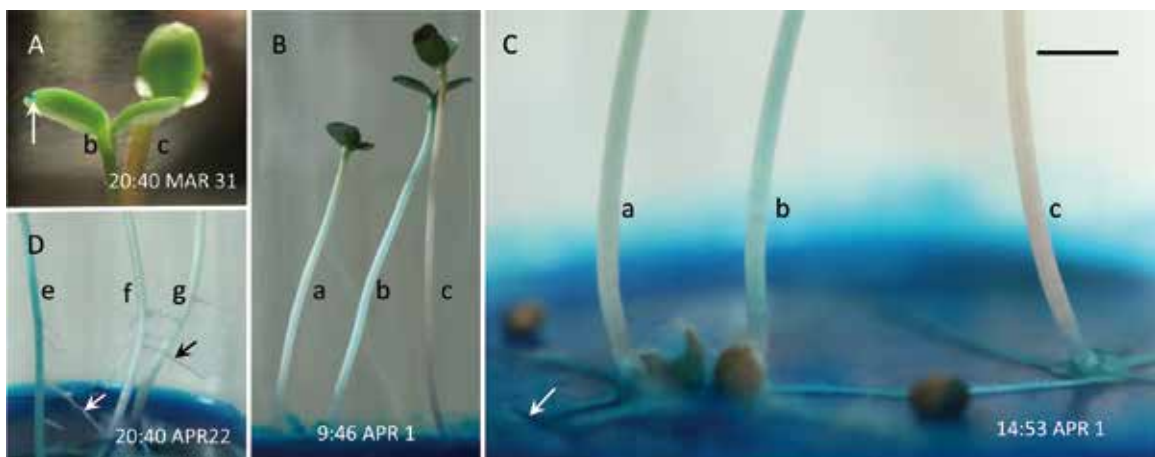


図3. 根を切ったハウセンカの芽生えにおける色水の浸透。図には撮影時間(月日と時:分)が入っている。A. 芽生えbと芽生えcの子葉の部分。矢印, 青い着色。B. 発芽して生じた芽生えの全体図。3本の胚軸が寒天平板上に立っている。芽生えaと芽生えbにおいては根を切ったために色水が胚軸を上昇したが, 根を切らなかった芽生えcでは変化はなかった。C. 寒天平板を斜め上から見たところ。矢印, 根の切断部。平板上には3個の種皮と1個の未発芽の種子が載っている。D. 根を切ってから22日経過した芽生えe-g。芽生えfとgは根を切らなかったために色水は上がっていない。3本とも胚軸に根が生じている(矢印)。スケール: 0.4 cm=A; 1 cm=B, D; 0.3 cm=C。

うち3粒が、そしてもう1つの瓶の4粒が発芽し、播種3日後には2枚の平板上に合計7本の胚軸の長い芽生えが立った（ここでは3粒から生じたものを芽生え a, b, c, また4粒から生じたものを、芽生え d, e, f, g と呼ぶ）。そこで平板に青色水を滴下した。色水は寒天平板全体に染み渡ったがすべての芽生えに変化はなく、芽生えが色水を吸い上げることはなかった。瓶内の湿度は高く、芽生えも排水 (guttation) によって子葉上に水滴を載せていたし、そのうえ瓶の内壁も細かい水滴によって曇っていたのでヘアドライヤーで冷風を吹き付け、芽生えの周りを乾燥させた。しかし、それでも7本の芽生えは色水を吸い上げなかった。そこで剃刀を割って作った刃の小片 (刃渡り4mm) でそれぞれの瓶の中の根を寒天平板ごと切ってみた (図3C, 矢印)。その結果根を切られた芽生え a, b (図3A, 矢印), d, e の子葉の先端部と胚軸 (図3B) がすぐ青く着色した。それに対して芽生え c (図3B, C), f, g には変化はなかった。これらの7本をその

まま数日間放置したところ、芽生え a, b, d, e の胚軸と子葉はより濃く着色したが、芽生え c, f, g に変化はなかった。同様の実験をすでに2度実施していたが、結果は同じであった。芽生え d を抜き取って胚軸の横断切片を顕微鏡で観察したところ胚軸にも IFC 型の維管束があった。図1Dでは道管のまわりの小さい細胞が着色しているが染色されているわけではなく、色は速やかに消滅した。根を切ってから22日後に瓶の中を観察すると着色の有無にかかわらず、芽生えの胚軸の中間部から新たに根が生じていたが、根を切らなかった芽生え c, f, g の胚軸はあいかわらず色水を吸い上げてはいなかった (図3D)。

3. 1. 3 ホウセンカの茎を用いた予備実験

ホウセンカの茎を用いて色水の浸透を観察した (図4)。材料は葉をつけた茎 a, 葉を取り去った裸茎 b, それに電子レンジ処理した死滅茎 c の3種類である。これら3本の茎を同時に赤い色水に入れてみた (図

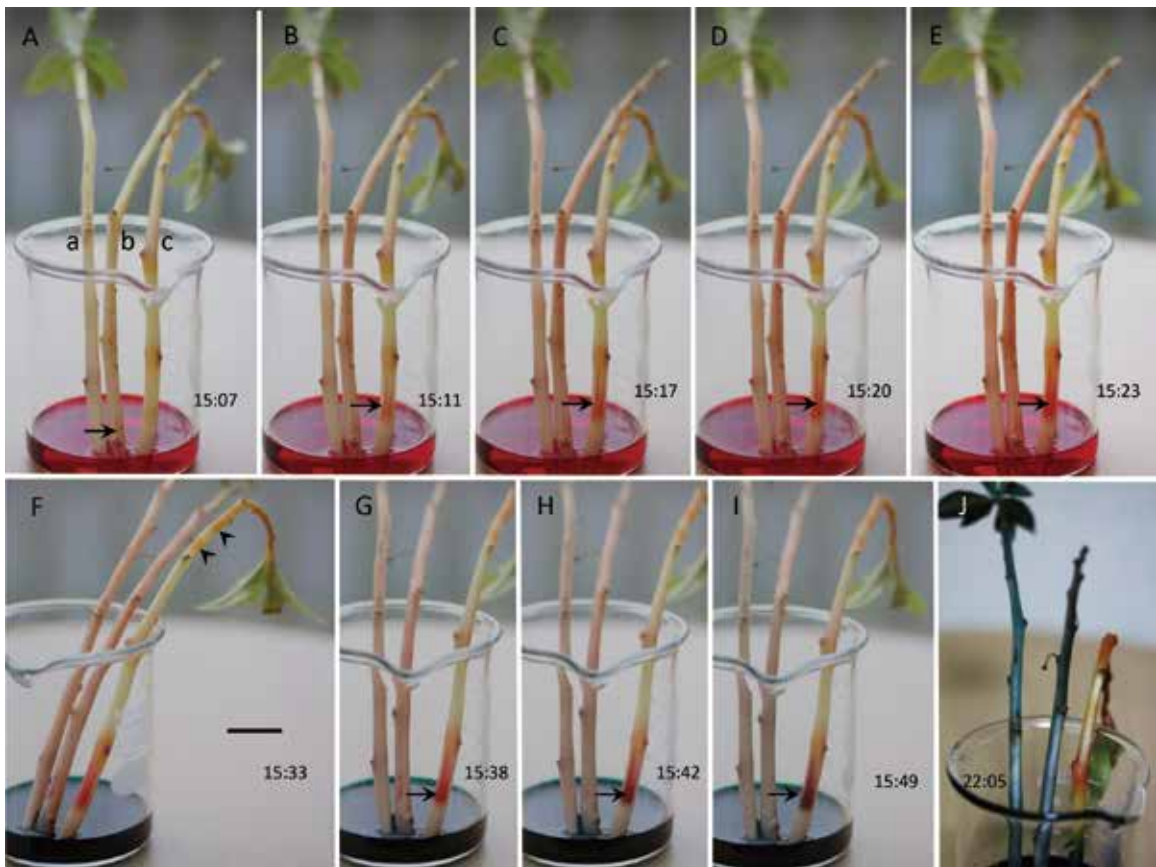


図4. ホウセンカの茎における赤色水 (A-E) と青色水 (F-J) の浸透。Aのa, b, cのそれぞれは葉をつけた茎 a, 葉を切り捨てた裸茎 b, 電子レンジ処理をほどこした死滅茎 c の3本を示す。A-Jまでのすべてにおいて左から右にその abc の順番に並んでいる。図には撮影した時間 (時:分) が入っている。A. 実験開始。赤い筋が直ちに裸茎 b に現れた (矢印)。B. 実験開始4分後。どの茎にも基部に赤い縦筋が認められたが、とくに死滅茎 c の筋がよく色づいた (矢印)。C-E. その後の12分間の赤色水の浸透。死滅茎 c の基部の着色部分的だけが次第に濃く色づいた (矢印)。F. 赤色水による吸水実験の後の青色水の浸透開始。死滅茎 c の上部に赤色水が浸透したことによって生じた赤斑 (やじり印) が見える。G-I. 青色水に変えてから16分間の浸透。赤く着色していた部分が次第に青く染まっていった (矢印)。J. 実験開始から6時間後。生きている茎 a と裸茎 b は全体が濃い青色に染まったが、死滅茎 c の場合青色水の上昇は基部から約4cmのところまで停止した。スケール: 1.7 cm。

4A-E)。赤い筋が、まず直ちに裸茎bの基部にあらわれた(図4A, 矢印)。ついで開始4分後、赤筋は死滅茎cに現れた(図4B, 矢印)。10~16分後には葉をつけた茎aにも筋が現れたが、死滅茎の筋はより濃く、かつ太くなった(図4C-E)。次にそれら3本を青い色水に移して実験を続けた(図4F)。図4Fはやや右側から見たものであるが、死滅茎の上部2か所に赤い色水の存在を示す赤斑が認められる(やじり印)。青色水による着色の場合も死滅茎が最も早く、赤色に染まっていたところを青くした(図4G-I)。実験の開始から6時間後には生きている茎aと裸茎bは全体が濃い青色に染まったが、死滅茎cでは青色水の上昇は基部から約4cmのところまで停止した(図4J)。

3. 2 植物の蒸散や吸水とは無関係な色水の浸透

チゴカンチクのたけのこ(シュート=葉をつけた茎)の茎とヒマの葉柄を用いて実験した。2014年11月~12月のことである。

3. 2. 1 縦に割ったチゴカンチクの茎の場合

チゴカンチクのたけのこの節間部の茎の長さ約15cmを切り取ってから、その基部の6cm程を剪定鋏で縦割りにし、下端の切り口を赤い色水の水面と接触させた(図5)。色水は瞬時に茎を上昇した(5mm/秒=図5A-D)。色水はその後も上昇を続け(0.85mm/秒)、接触から31秒後には2.2cm(図5E)に達し、上昇中の先端はやがて縦割りにした部分を超えて茎の中に入っていった(図5F)。青い色水と接触させた場

合も同様であった(図5G)。いずれの場合も色水は維管束のみを通るわけではなく、縦割りにした際に生じた表面の凹凸の影響もあって横方向や斜めの方向にも広がった(図5E, F)。次に長さ6~10cmに切り取った茎全体を縦に割り、色水が茎の上から下へ、あるいは下から上へと浸透する様子も観察した(図5H, I)。自然状態における汁液の浸透方向とは逆であるが、色水は下からよりも上からのほうが速やかに浸透した(図5, H)。図5Iは色水を最初上から(自然とは逆の方向)、次いで(約1秒後)下から浸み込ませた結果である。浸透実験開始から3~5秒程度後に撮影した。

3. 2. 2 切り取ったチゴカンチクの茎を色水に挿した場合

チゴカンチクのたけのこから切り取った茎の節間部(長さ約20cm)についても赤色水の浸透実験を行った(図6)。実験に用いたのは切り取っただけの茎a、切り取ったあと上下を逆にした逆茎b、切り取ったあと電子レンジ処理を施した死滅茎c、それに死滅させた茎の上下を逆にした死滅逆茎dの4本で、これらを同時に赤色水に挿し込んだ(図6A)。挿し込んでから1時間17分後、まず逆茎bの切り口において、表皮の近くの維管束のいくつかに赤色が認められた(図6B, 矢印)。3時間47分後には茎aと逆茎bの両方も表皮に近い多くの維管束が濃く色づいていた(図6C)。その時死滅茎cと死滅逆茎dにおいて、色水は切り口まで到達していなかったが(図6D)、その

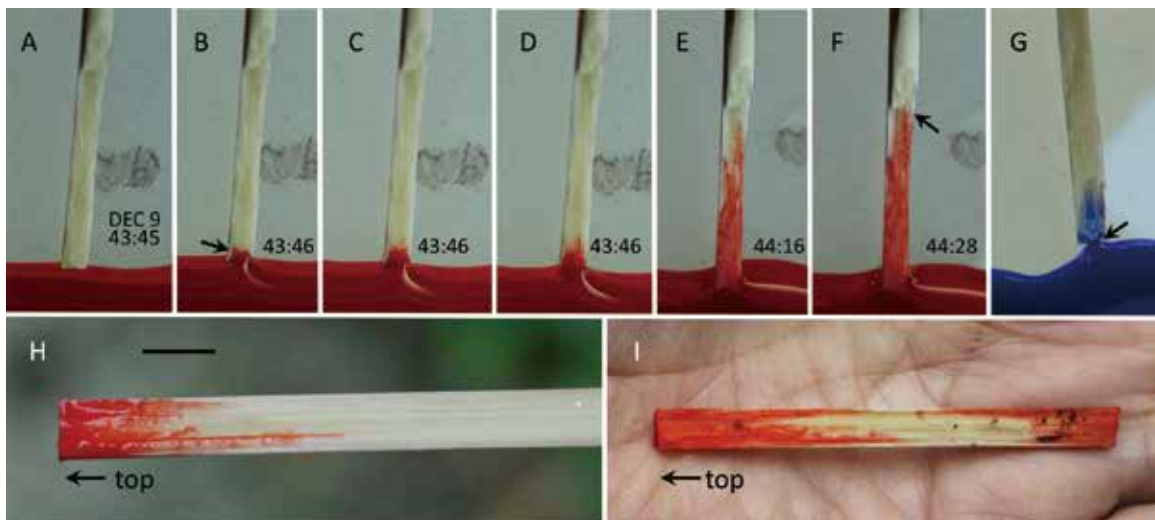


図5. 縦に割ったチゴカンチクの茎における色水の浸透。A-F. 茎の横断面と赤色水との接触。切り取った茎の節間部(長さ100mm程度)の下半分を縦割りにし、その下端の切り口を色水の水面と接触させた。色水は瞬時に茎を上昇した。図には撮影した時間(月日と分:秒)が入っている。H. 茎の上から下に向かった色水の浸透。逆にしない場合と同様であったが、浸透速度はより速かった。I. 色水を最初に上から(自然とは逆の方向)、次いで(約1秒後)下から浸透させた実験。浸透実験開始から5秒程度後に撮影した。top, 自然状態における茎の先端方向を示す。スケール: 1cm=A-G; 0.5cm=H; 0.8cm=I。

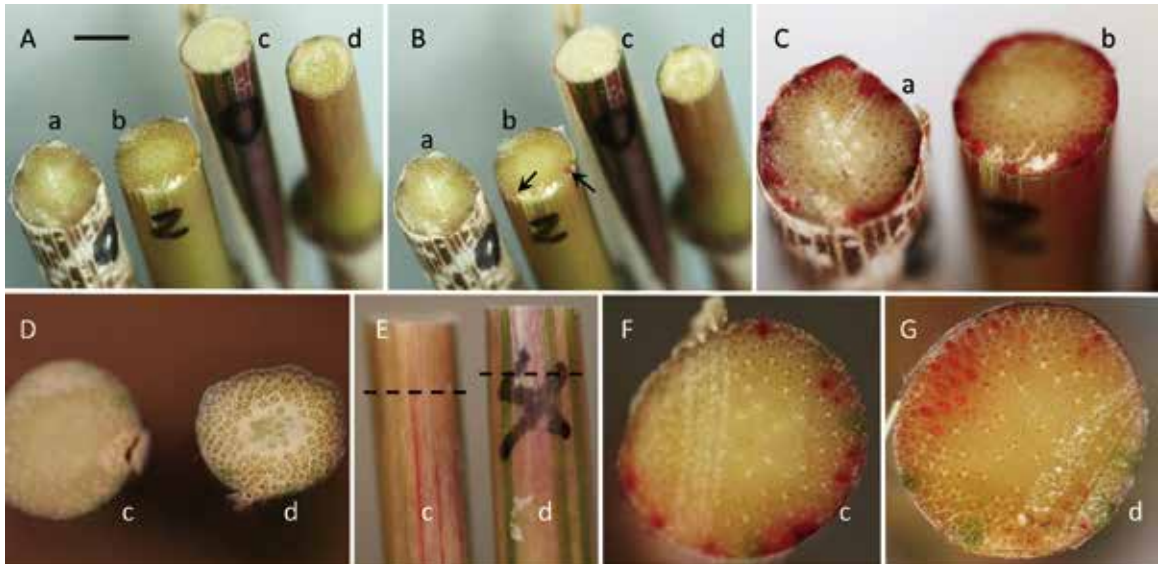


図6. 切り取ったチゴカンチクの茎（長さ約20 cm）への色水の浸透。a, b, c, dのそれぞれは、切り取っただけの茎 a, 切り取ったあと上下を逆にした逆茎 b, 切り取ったあと電子レンジ処理を施した死滅茎 c, それに死滅させた茎の上下を逆にした死滅逆茎 d の4本である。A. 赤色水に挿し込まれた直後の茎。B. 挿し込まれてから1時間17分後の様子。逆茎 b の切り口において、維管束のいくつかに赤い着色が認められた（矢印）。C. 3時間47分後の様子。茎 a と逆茎 b の両方とも表皮に近い多くの維管束が濃く色づいた。D. 同じく3時間47分後の死滅茎 c と死滅逆茎 d の様子。色水は切り口まで到達していなかった。E. 死滅茎 c と死滅逆茎 d の側面観。色水は表皮直下の切り口付近までは到達している。F. 死滅茎 c の切り口近く（図Eの左側の点線部）を切った横断面。着色の程度は低かったものの生きた茎の場合と同じく着色していた。G. 死滅逆茎 d の切り口近く（図Eの右側の点線部）を切った横断面。同じく切断面に見られる維管束のうち表皮に近いものだけが着色していた。スケール：3mm=A, B, E; 1.7mm=C, D; 11mm=F, G.

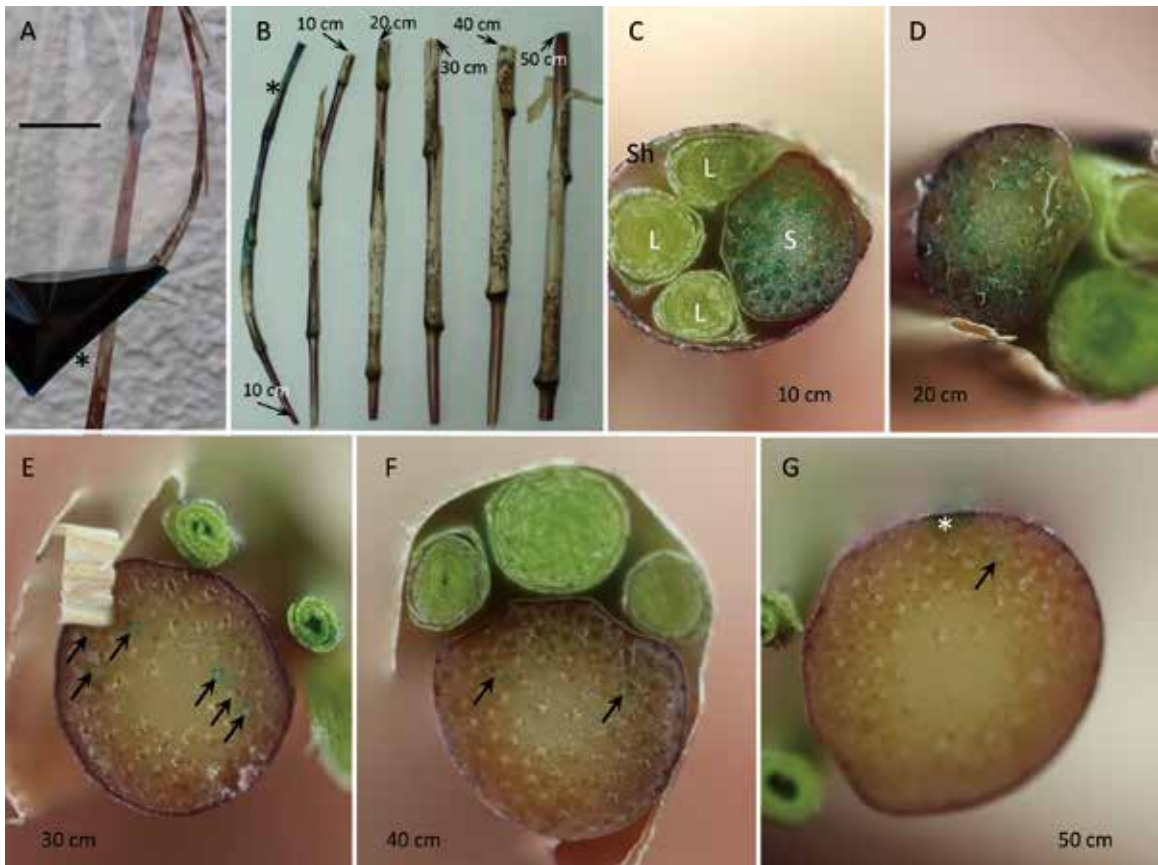


図7. チゴカンチクの茎における自然とは逆の方向への色水の浸透。植栽されているたけのこをそのまま使用した *in situ* での実験である。B-Gには茎の先端部切り口からの距離（cm）が入っている。A. 浸透の開始。先端部を切り取った茎の切り口は青色水に挿し込まれている（*印）。B. 実験開始10分後に10 cmの間隔に切った茎。6本ある。*印, Aの*印と同じ場所（茎の先端部）。C. 茎の断面。ほぼすべての維管束が青く染まっている。L, 側枝の葉; S, 茎; Sh, 葉鞘。D. 茎の断面。約半数の維管束が青くなっている。E. 茎の断面。6本の維管束が青くなっている（矢印）。F. 茎の断面。2本の維管束が青くなっている（矢印）。G. 茎の断面。1本の維管束だけが染まっている（矢印）。*印, 本来の茎のクロロフィル。スケール：0.5 cm=A; 0.2 cm=B; 1 mm=C-G.

2本を横から見ると、表皮直下の維管束の切り口の近くまでは到達していることがわかった(図6E)。そこで図6Eの点線部を切ったところ、着色の程度は低かったものの生きた茎の場合と同じく死滅茎cにおいても(図6F)、また死滅逆茎dにおいても(図6G)生きた茎aの場合と同じく切断面に見られる維管束のうち表皮に近いものだけが着色していた。死滅逆茎を除くと着色した維管束は表皮に近いものに限られていた。また、茎aと逆茎bでは色水は維管束の外まで広がっていた(図6C)。

3. 2. 3 チゴカンチクの茎を用いた *in situ* での実験

通常の汁液の流れとは逆に向かう色水の浸透についてチゴカンチクの長さ220 cmのたけのこを用いて実験した(図7)。すなわち地上に伸び出たたけのこの先端の約2 cmを切り捨てて、その先端部を下に曲げてから青色水に挿し込んだ(図7A, *印)。実験開始から10分後、たけのこ全体を切り取って、先端から約10 cmの間隔で切断した(図7B)。なお、図7Bの*印は図7Aの*印と同一の部分であることを示している。ここで図7B左端の1本の下端と2本目の上端は同一箇所であるが、後者のほうがはるかに太く見えている。その理由は2本目の上端部には3本の側枝とそれらの全体を包む葉鞘とが残っているためである。他

の切断茎についても同様である。これら6本について横断面を観察すると、先端から10 cmのところでは、散在するほぼすべての維管束が、そして、20 cmのところでは約半数の維管束が青く染まって見えている(図7C, D)。その下の30 cm, 40 cm, 50 cmの各横断面では、それぞれ6本, 2本, 1本の維管束が染まって見え(図7E-G, 矢印), 60 cmのところでは浸透は確認されなかった。このように後述する *in situ* におけるヒマの葉柄の場合(図9)と同様、色水は通常の汁液の流れとは逆の方向に速やかに浸透した。なお、図7C中のL, S, Shは、それぞれが側枝の葉と茎と葉鞘であることを、そして図7G中の*印は青色水によるものではなく、そこには茎本来のクロロフィルが局在していることを示している。

3. 2. 4 ヒマの葉柄の場合

ヒマの葉柄(長さ23~26 cm)を色水に挿し込んで青色水の浸透を観察した(図8)。材料は葉身を切り取っただけの葉柄a, 切り取ったあと上下を逆にした逆葉柄b, それに切り取ったあと電子レンジ処理を施した死滅葉柄cとその上下を逆にした死滅逆葉柄dの4種類である。まず、葉柄aと逆葉柄bについて実験した(図8A-C)。青色水は、青い筋として両方の葉柄の表面に認められるようになり、開始から1時間16

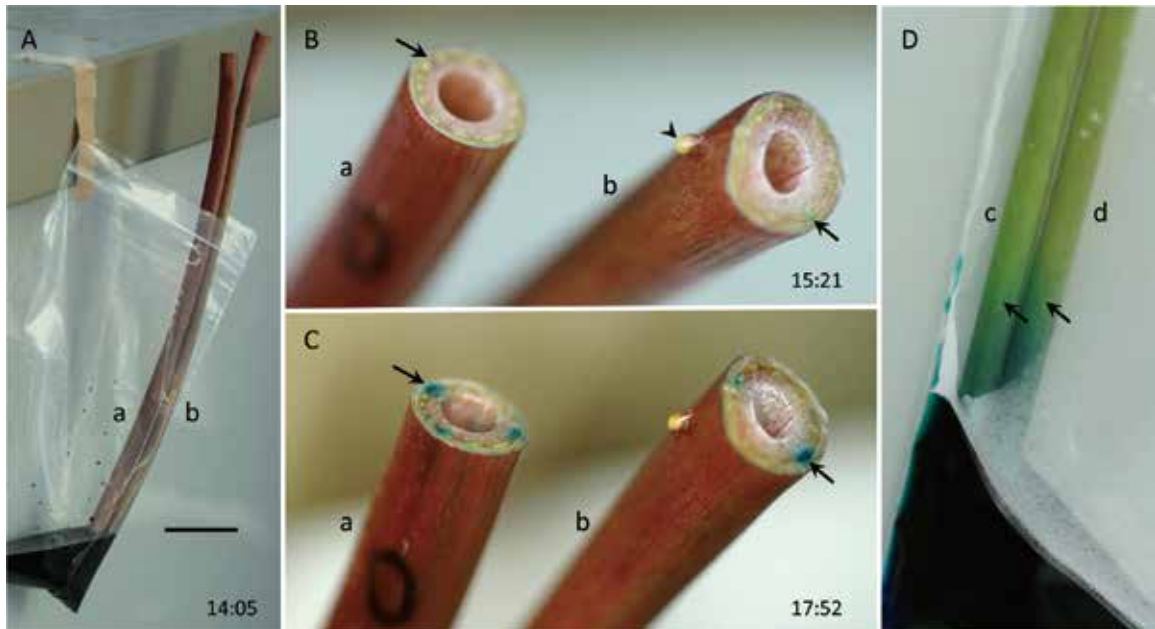


図8. 切り取ったヒマの葉柄(長さ23~26 cm)への色水の浸透。a, b, c, dのそれぞれは、葉身を切り取っただけの葉柄a, 切り取ったあと上下を逆にした逆葉柄b, 切り取ったあと電子レンジ処理を施した死滅葉柄c, 死滅葉柄の上下を逆にした死滅逆葉柄d, の4種類の茎を示す。これらを青色水に挿し込んだ。A-Cには撮影した時間が入っている(時:分)。A. 実験開始。葉柄aと逆葉柄bとを色水に挿した。B. 開始から1時間16分後の葉柄の切り口。かすかではあるが両者の維管束のいくつかに青色が認められた(矢印)。やじり印, 葉柄の基部の蜜腺。C. 実験開始から3時間47分後。一部の維管束が濃く色づいた。D. 死滅葉柄cと死滅逆葉柄dへの色水の浸透。両者とも色水は葉柄全体を着色しながら上昇したが、実験開始2時間30分後には、下端から4.5 cmあたりに達したところで停止した(矢印)。スケール: 2.7 cm=A; 1.6 cm=C, B; 4.5 cm=D。

分後には、かすかではあるが両者の切り口の断面の維管束のいくつかに認められた（図8B, 矢印）。なお、図8Bのやじり印は葉柄の基部にある蜜腺である。切り口に見える維管束は両者とも3時間47分後には濃く色づいたが、色づいたのは全体のごく一部の維管束であった（図8C）。次に死滅葉柄cと死滅逆葉柄dについて実験した。両者とも青色水に挿しこんだ後に青筋が現れることはなく、色は葉柄全体を着色しながらゆっくりと上昇した（図8D, 矢印）。しかし、開始2時間30分後には、上昇は下端から4.5 cmあたりに達したところで停止しており（図8D）、上端の切り口にまでは到達しなかった。

3. 2. 5 ヒマの葉柄を用いた*in situ*での実験

汁液の流れとは逆方向の色水の浸透はヒマの葉柄についても実験した（図9）。ただし葉柄は切り取らず、植物体についてそのまま使用した（図9A）。まず、葉の葉身部を切り落とし、残った長い葉柄の先端部分を赤色水（図9B, *印）と青色水（図9B, **印）と

に挿し込んだ。ヒマの葉柄は古くなると下を向くのでそれをわざわざ曲げることはなかった。葉柄の長さは、赤色水に挿したもの（図9A, B, 二重矢印）が26 cm、青色水のもの（図9B, 三重矢印）が23 cm、コントロールの葉をつけたままのもの（図9A, 矢印）が22 cmであった。1時間後に茎に近い葉柄の基部を切ったところ、赤色、青色ともその部分に到達していることがわかった（図9D, E）。葉柄基部の維管束はコントロールの葉柄では白く見えるが（図9C, 矢印）、赤色水と青色水が浸透したものでは、それぞれの維管束が赤色と青色に着色していた（図9D, E, 矢印）。なお、図9Dの*印は突出型の蜜腺で（焦点は外れている）、蜜腺の存在によってこの切り口が葉柄基部のものであることがわかる。

4. 考察

Halesは、植物が人為的にある環境に置かれると植物体内の汁液が通常とは別の、時には正反対の方向に

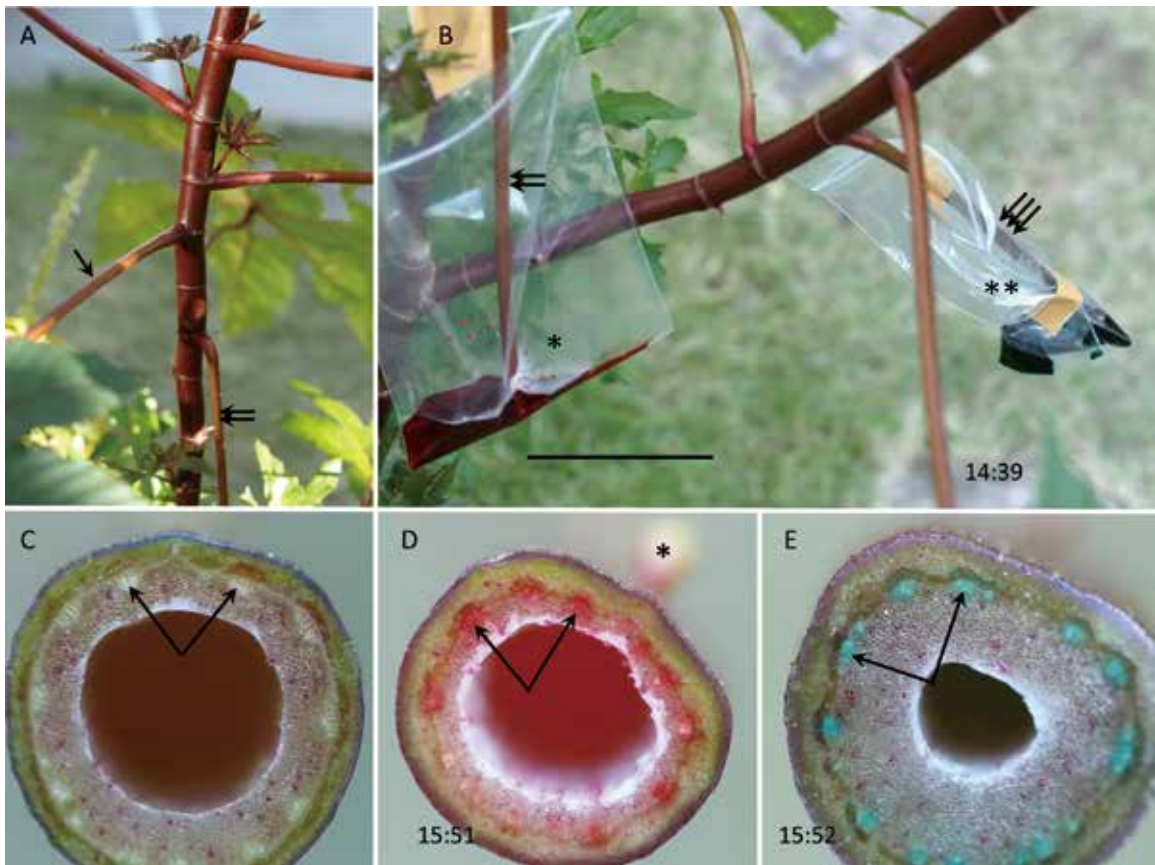


図9. ヒマにおける自然とは逆の方向への色水の浸透。植栽されている植物の葉柄を使用した*in situ*での実験。A. ヒマ。矢印と二重矢印は実験に用いた葉柄を示す。B. 浸透の開始。葉身を切り取って、葉柄先端部の切り口を赤色（*印）と青色（**印）の色水に挿し込んだ。二重矢印はAの二重矢印と同一の葉柄を示す。三重矢印は青色水に挿し込んだ葉柄である。C. 浸透実験を行わなかった葉柄（Aの中の矢印）の基部の横断面。矢印、維管束。D. 先端を赤色水に挿し込んだ葉柄（A, Bの二重矢印）の基部の横断面。矢印、赤く染まった維管束。*印、蜜腺（常に葉柄基部にある）。E. 先端を青色水に挿し込んだ葉柄（Bの三重矢印）の基部の横断面。矢印、青く染まった維管束。スケール: 13 cm=A; 6.3 cm=B; 1.1 cm=C-E。 図中の数字は時:分。

流れることを実験で示した。環状剥皮の実験が最も有名であるが (Strasburger et al., 1908 ; Fitting et al., 1921), 彼はその他にもさまざまな実験を行った。そのうちの2つは以下のとおりである。1つは切り取ったリンゴ (*Malus* sp.) の大枝を逆さにし、主枝の先端も切って瓶に挿すという実験である (Hales, 1727, fig. 22 : 図10A)。枝の切り口は湿った土で固められ、皮袋がかぶさっている。水は図10A中のbから吸い込まれ、小枝e-hの分岐部から4本の小枝に向かって移動したあと蒸散した。そのさい、bからe-hまでの汁液の流れは自然状態における流れとは逆であった。この逆さ枝は3日と2晩の間に4ポンドと2.5オンスを吸水したそうである。もう1つ (Hales, 1727, fig. 25 : 図10B) は、植物教科書などに転載されたり (三好, 1911), あるいは別のセリ科の植物を用いて追試されたりした実験である (Pfeffer, 1900)。材料はセイヨウミザクラ (*Prunus* sp.) とリンゴ (*Malus* sp.) とスグリ (*Ribes* sp.) の3種で、どれも大枝である。枝はいずれも切断部近くで二又となっているので、2本の小枝をもっており、図10Bのaのところでは1本のレール (図には描かれていない) に上下を逆にしておら下げられた。その2本のうちの一方をバケツdの中の水cに沈めておくとセイヨウミザクラの場合は8日目によりやく萎れが見られたが、スグリとリンゴの枝は11日目まで萎れなかったという。これらの2つの実験で注目すべき点は2つある。すなわち瓶やバケツの水

は吸収された後、それぞれの枝の岐路のところまでは自然状態とは逆方向に移動した、という点と、いずれの場合も水は蒸散によって吸い上げられた、という点である。

わが国の小学校6年生が使う理科の教科書においても蒸散によって色水が茎を上昇するとされる図が示されている。(有馬ら, 2015; 石浦, 鎌田ら, 2015; 癸生川, 2015; 霜田, 森本ら, 2015; 毛利, 黒田ら, 2015; 養老, 角屋ら, 2015)。本研究では茎における汁液の移動ではなく浸透を検証することが目的であるが、その前に1つ確認すべき事項があった。それはどの教科書においてもホウセンカは「根が色水を吸う」となっている点である。そこでホウセンカの芽生えを寒天平板上で種子から育て色水 (ファンタジー) を吸わせてみた。その結果、芽生えは根を切るまで色水を吸わなかったのである。教科書のホウセンカが染まっているのは、明らかに根の一部が切れたためと思われる。根の内皮にはカスバリー線 (またはカスバリー点) があって汁液を通さないため、土壌から入ったアポプラスト中のイオン類は必ずシンプラストである内皮細胞を通るからである (Epstein, 1973)。色水の中の色素などは内皮の細胞中に入れられないためその先に進むことはなく、茎を上昇することもない。もし、根を切れば、内皮を経由しないので色水は直接維管束を上昇できることになる。

この芽生えを用いた実験からは色水が子葉からの蒸

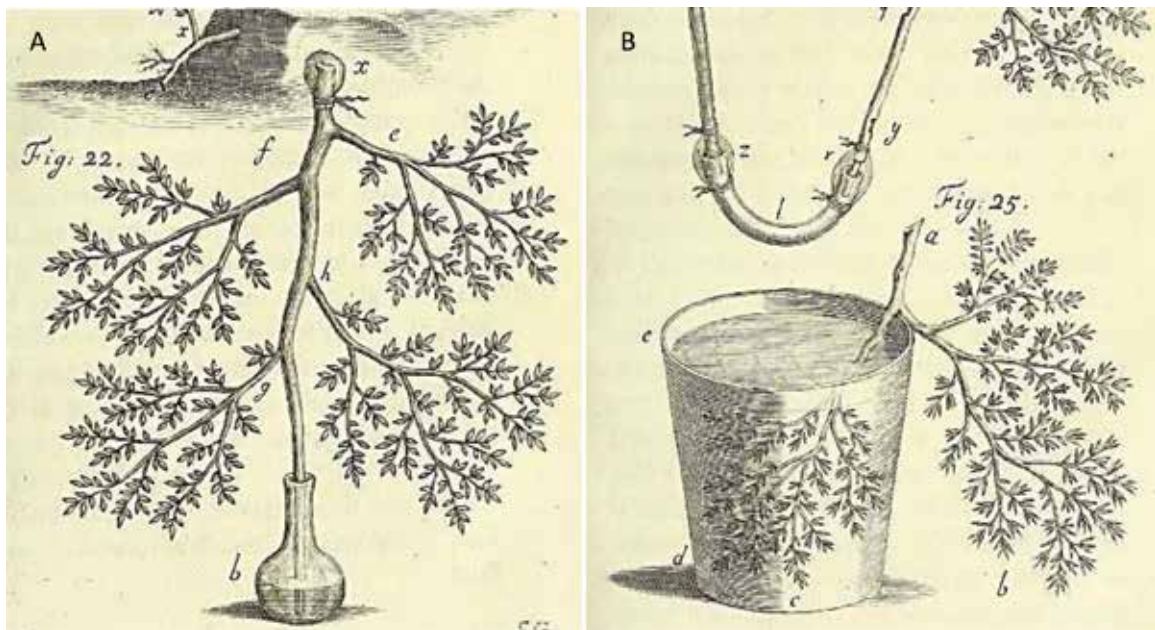


図10. 約300年前に行われた吸水実験。Hales (1727) から転載した。A. 切り取った4本の枝 (e-h) をもつ大枝の基部 (x) はセメントで固められ、皮袋で覆われて湿らせてある。一方、枝の先端部 (b) は、その先端を切り取った後、瓶中の水に挿してある。茎の先端で吸収された水は茎を逆の方向に移動した。B. 全体が二又になった大枝 (a) の一方 (c) だけをバケツ (e) の中の水 (d) に沈めてある。cで吸水された水は自然とは逆の、枝の基部に向かって移動し、二又のところからbに入った。A, Bのような状態にあっても大気中の大枝は長期間しおれなかったという。

散によって上昇したのかどうかについてはわからない。そこで次にハウセンカの茎を使って実験した。用いたのは葉をつけた茎、葉を取り去った茎、それに葉をつけてはいるが電子レンジ処理によって死滅させた茎の3種類である。茎はビーカーに入れた色水に同時に挿した。その結果、死滅させた茎では茎の途中で上昇は止まったが、色水はこれらすべての茎を上昇し、時間経過とともに濃く色づいた(図4J)。このようにハウセンカにおいて色水が葉を取り去った茎においても葉をつけたものとはほぼ同じ速度で上昇したので、色水は植物体の中に、蒸散とは無関係に浸透するのではないかと考えた。そこでチゴカンチクとヒマの茎を用いて浸透実験を行ったのである。ここでハウセンカを使用しなかった理由は実験の実施が冬であり、その植物を入手することができなかつたためである。

チゴカンチクはちょうどたけのこが伸びきったところであった(高さ、~220 cm)。剪定鋏でその節間部を切り取って、縦に割ってすぐ色水と接触させると、色水はその上端からも下端からも瞬時に浸透し、その後は1秒あたり0.85 mmの速度で、横方向にも広がりながら浸透した。割ってすぐの実験で切断面は湿っていたが、毛細管現象によって浸透したものと考えられる。次に、茎を長さ20 cmに切り取って切断せず、色水に挿してみた。そのさい切り取っただけの茎a、上下を逆にした逆茎b、電子レンジで死滅させた死滅茎c、それにそれを上下逆にした死滅逆茎dの4種類を作って調べてみた。その結果2種類の死滅茎の場合は色水の上昇は途中で停止したが、生きた茎の2本は切断面まで到達した。ファンタジーの色水は茎の上下とは関係なしに茎の中を浸透したのである。そこで長さ220 cmのたけのこの先端の2 cmを切り取って先端部を下に曲げ、それを色水に挿してみた。*in situ*での実験である。すると色水はわずか10分の間にたけのこの先端から50 cm下まで浸透したのであった。

同様の実験をヒマの葉柄でも試してみた。その結果、葉柄a、逆葉柄b、死滅葉柄c、死滅逆葉柄dでチゴカンチクの茎におけると同じ色水の浸透が観察されたのである。死滅した2種類の葉柄の場合、色水が反対の切り口まで到達しない点も同じであった。これはまた予備実験のハウセンカの茎でも同じであった。ヒマについても*in situ*における浸透実験も行ったが、これも結果はチゴカンチクの場合と同じであった。

ところで、切り花着色剤は最近教育現場で注目されているが(岩手県総合教育センター, 2012; 那覇市立教育研究所, 2012)、この度改訂された小学校理科の教科書にも採用された(石浦、鎌田ら, 2015; 霜田、

森本ら, 2015; 毛利、黒田ら, 2015; 養老、角屋ら, 2015)。この類の色水は茎や葉における「水の通り道」を通るのでその“通り道を示す”ためには問題はなく(犀川, 2006; 2007; 2009)、教科書の図とその説明も許される範囲内であろう。しかし、教科書の“虹色のバラ”を紹介したページは問題である(石浦、鎌田ら, 2015; p. 59)。なぜならそのページには「植物が根から吸い上げた水は、……」など、「吸った」という言葉が3か所もあるからである。本研究で示したように7色の色水は植物が吸ったわけではなく、それぞれの色水が茎の切り口から浸み込んで花弁の隅々にまで達しただけのことである。ついでに言えばその虹色のバラは単なる染め分けされた切り花であり、有名な“青いバラ”とは違って科学的なセンスで作られたものでは決していない。それを理科の教科書がわざわざ1ページ分の記事として取り上げて、作者の名前と顔写真まで掲載したのは常識の範囲を大幅に逸脱した過ちであった。

色水を使用するさい教師は少なくとも以下の2点について承知しておく必要がある。すなわち、色水は水の通り道を示してはいるが、(1)それは蒸散と、それによって引き起こされる吸水によって茎を上昇するわけではない点と、(2)色水が茎を上昇する場合は、根の一部を切ったときのみ起きる点である(無傷の根は色水を吸い上げない)。本研究で示したように色水は葉のあるなしにかかわらず、また、茎の上下にかかわらず植物体内に速やかに浸透するのである。おそらく赤インク(藤井, 1911)や食用色素を溶かした水(有馬ら, 2015; 癸生川, 2015)なども速度こそ遅いが、同様に上下左右あらゆる方向に浸透するものと思われる。もし、ハウセンカなどを用いて色水の上昇を生徒に演示するときには、教師は色水が蒸散によって上昇しているのではないことを付け加えるべきである。

5. 謝辞

私は東京学芸大学副学長の長谷川正先生、ならびに理科教員高度支援センター長の松川正樹先生には研究を進めるうえでたいへんお世話になった。ここに深く感謝申し上げたい。

6. 引用文献

- Beck, C. B. 2010. An introduction to plant structure and development. Plant anatomy for the twenty-first century. 2nd ed., Cambridge Univ. Press, Cambridge.

- Dixon, H. H. and Joly, J. 1894. On the ascent of sap. *Ann. Bot.* 8: 468-470.
- Epstein, E. 1973. *Roots. Sci. Amer.* 228: 48-58.
- Fitting, H., Jost, L., Schenck, H. and Karsten, G. 1921. *Strasburger's text-book of botany. 5th English edition. Revised by Lang, W. H. Macmillan, London.*
- Hales, S. 1727. *Vegetable staticks, or, an account of some statical experiments on the sap in vegetables: being an essay towards a natural history of vegetation. Also, a specimen of an attempt to analyse the air, by a great variety of chymio-statical experiments; which were read at several meetings before the Royal Society. W. and Innys, London.*
- Mohr, H. and Schopfer, P. 1995. *Plant physiology (Translation of Pflanzenphysiologie 4 Auflage by Lawlor, G. and Lawlor, D. W.). Springer, Berlin.*
- Pfeffer, W. 1900. *The physiology of plants; a treatise upon the metabolism and sources of energy in plants. Clarendon Press, Oxford.*
- Strasburger, E., Noll, F., Schenck, H. and Karsten, G. 1908. *Lehrbuch der Botanik für Hochschulen. Gustav Fischer, Jena.*
- 有馬朗人ほか43名. 2015. 新版たのしい理科6年. 大日本図書.
- 石浦章一, 鎌田正裕ほか54名. 2015. わくわく理科6. 啓林館.
- 岩手県立総合教育センター. 2012. 中学校理科観察・実験書. 学習指導要領改訂に伴う中学校理科観察・実験指導資料. www1.iwate-ed.jp/db/db1/ken_data/center/h23_04g5_1.pdf.
- 癸生川武次. 2015. たのしい理科6年. 信教出版.
- 犀川政稔. 2006. シモバシラの霜柱形成におけるいくつかの新知見. 東京学芸大学紀要自然科学系. 58: 151-161.
- 犀川政稔. 2007. シモバシラによる霜柱形成と木部にできる二次的な水の通路. 東京学芸大学紀要自然科学系. 59: 61-67.
- 犀川政稔. 2009. ホウセンカは小学校3年理科の「植物の育ち方」の教材として不適當. 東京学芸大学紀要自然科学系. 61: 81-87.
- 犀川政稔. 2014. ホウセンカの維管束図を双子葉植物一般の図として教科書に用いることは不適當. 東京学芸大学紀要自然科学系. 66: 159-180.
- 霜田光一, 森本信也ほか34名. みんなと学ぶ小学校理科6年. 学校図書.
- 那覇市立教育研究所. 2012. Welcome to the サイエンス・ワールド. 那覇市立教育研究所理科通信. 第36号.
- 藤井健次郎. 1911. 女子理科植物教科書. 開成館.
- 松永武・佐伯英人. 2011. 中学校の理科授業におけるホワイトボードを活用した話し合い活動. 山口大学教育学部附属教育実践総合センター研究紀要. 32: 7-16
- 三好学. 1911. 最新植物学講義. 上巻. 富山房. 東京.
- 毛利衛・黒田玲子ほか32名. 2015. 新編新しい理科6. 東京書籍.
- 養老孟司, 角屋重樹ほか27名. 未来をひらく小学校理科6. 教育出版.